

# 海洋平台用钢的焊接疲劳性能分析\*

## FATIGUE ANALYSIS OF WELDED JOINTS IN OFFSHORE STRUCTURE

黎之奇\*\* 柳春图 崔民子 阚常珍

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

LI Zhiqi LIU Chuntu CUI Mingzi KAN Changzhen

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**摘要** 对平台用钢的焊接疲劳性能进行了研究,采用威布尔分布对试验数据进行了分析。给出各种可靠度下的  $R-S-N$  曲线估算式,并与对数正态分布处理的结果进行了比较,对海上石油钻井平台的安全性评估具有一定的意义。

**关键词** 焊接接头 疲劳寿命

**中图分类号** TG405 TG407

**Abstract** The experimental investigation of fatigue behaviour of welded joints in offshore structure are described. Life estimate formulas for  $R-S-N$  curve are derived based on the Weibull distribution, and the results are compared with the result based on logarithmic normal distribution. It is possible to predict the safety and reliability of offshore structure.

**Key words** welded joints, fatigue life

### 1 引言

海上石油钻井平台在设计和制造中大量采用焊接连接,由于在结构上的特殊性,焊接结构在交变应力的作用下易发生疲劳断裂而导致失效,因此,焊接接头的疲劳性能研究对平台的安全性评估具有重要的意义。目前对钻井平台焊接接头的疲劳强度设计及寿命估算仍是基于由试验得到的  $S-N$  曲线,并已形成了一些规范,如美国焊接学会提出的 AWS-X 曲线和美国石油研究所提出的 API-X 曲线。许多研究者对这方面的工作做了努力,考虑了板的厚度及焊缝形状的影响<sup>[1,2]</sup>,对焊缝热点应力的计算进行修正<sup>[5]</sup>以及环境和加载历史的影响等<sup>[3,4]</sup>。焊接结构的疲劳寿命受工艺、连接方式及工作环境等方面的影响较大,由于实验周期长,考虑了可靠度的  $R-S-N$  曲线并未真正建立,目前这方面的工作仍在进一步完善中。

### 2 试样及加载方式

#### 2.1 试样形式及尺寸

试样形式为 T 型,其尺寸如图 1 所示。中间部分为 A514 高强度钢,两侧为 EH36 中强度钢,采用 LB-52 型焊条进行焊接,焊缝形式为 V 形,表 1 为这三种材料的化学成份。

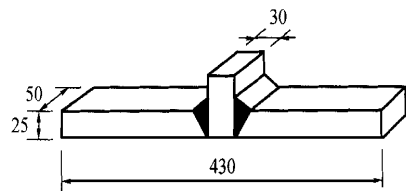


图 1 试样形状及尺寸

Fig. 1 Shape and size of specimen

EH36、A514 钢及焊缝金属的力学性能如下

EH36	$\sigma_b$ 490 MPa	$\sigma_s$ 357 MPa	$EL$ 22 %
A514	$\sigma_b$ 770 MPa	$\sigma_s$ 700 MPa	$EL$ 13 %
焊缝金属	$\sigma_b = 560$ MPa	$\sigma_s = 490$ MPa	$EL = 32$ %

试样在制备过程中先用较大的钢板进行焊接,然后在远离焊缝两端的位置按所需尺寸切割出试样,以消除焊缝的起始端和结束端可能带来的边缘效应。

表 1 EH36 中强度钢、A514 高强度钢及 LB-52 焊条的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of EH36, A514 steels and LB-52 welding rod

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mb	B	No	Ni	Cu	V
EH36 钢	0.10	0.60	0.035	0.04	0.15	0.40	0.40	0.001 2	0.00	0.00	0.00	0.00
A514 钢	0.16	0.96	0.04	0.04	0.10	0.25	0.00	0.00	0.08	0.40	0.35	0.10
LB-52 焊条	0.08	0.96	0.011	0.007	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

\* 19980518 收到初稿,19980719 收到修改稿。

\*\* 黎之奇,男,1963 年 2 月生,汉族。力学研究所助理研究员,硕士。从事疲劳强度的实验研究。

### 2.2 加载方式

大量的试验已表明,焊接构件的疲劳破坏开始于焊趾处,即母材与焊缝金属的结合部。为保证两侧焊缝的受力状态相同,加载方式采用四点弯曲方式,以使试样在焊缝附近的一段区域内保持为纯弯曲,保证了两侧焊缝在焊趾处的最大应力完全相同。

试样在焊接后的冷却过程中,由于两侧焊缝收缩的不均匀性,将导致两侧的 EH36 钢板不再在同一平面上。为避免在加载过程中因载荷分配不均而引起的附加弯曲及扭曲,在实验过程中采用了特制的自适应式夹具,使载荷能够均匀地分布在一条直线上(图 2)。

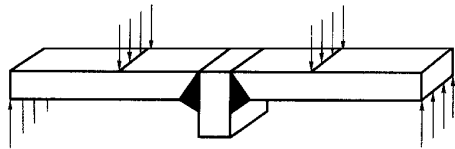


图 2 试样的加载方式

Fig.2 Loading method of specimen

### 2.3 应力比的影响

钻井平台在实际工作中各个接头的静载和动载互不相同,因此其应力比也各不相同。目前的研究结果已表明,当应力幅  $\sigma_a$  不变时,应力比的增加将加快材料的损伤,使结构疲劳寿命降低。因此,在试验中将应力比取为平台实际工作应力比的上限,得出的结果对寿命估算将偏于安全。

### 3 试验数据的处理

可靠性分析在疲劳设计中具有重要的意义,目前使用较多的为对数正态分布和威布尔分布。对数正态分布由于较为方便而得到广泛应用,但也存在着一些不足,一是试验数据并非完全是正态分布,采用对数正态分布时得到的结果将是近似的;二是对数正态分布密度函数以水平轴为渐近线,在可靠性取得较高时对寿命的估算结果将偏于保守。威布尔分布由于有三个参数,得出的分布函数与试验结果符合得更好一些,同时威布尔分布存在一个起始寿命,因此在要求高可靠性时对寿命的估算更接近实际情况。

威布尔分布密度函数为

$$f(N) = \frac{b}{N_a - N_0} \left( \frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (1)$$

式中  $N, N_0$  ——试样寿命,起始寿命

$N_a$  ——特征寿命,其对应的寿命分布函数值为 63.2 %

$b$  ——形状参数或威布尔斜率

威布尔分布函数为

$$F(N) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (2)$$

对式(2)进行适当变换后可得  $y = -2.303bx + c$  (3)

其中  $y = -\ln \ln [1 - F(N)]^{-1}$   $x = \lg(N - N_0)$

$$c = 2.303b \lg(N_a - N_0)$$

式(3)表明,在威布尔坐标纸上,威布尔分布曲线成为直线,其斜率为  $b$ 。试样的存活率按下式计算

$$p = 1 - F(N) = 1 - \left[ \frac{i}{(n+1)} \right] \quad (4)$$

式中  $i$  为将试验结果依小到大排列的序数,  $n$  为子样容量。如果适当选择  $N_0$  的值,在威布尔坐标纸上可使试验数据落在一条直线的近旁,则试验结果服从威布尔分布。

威布尔分布的可靠度函数为<sup>[6]</sup>

$$R = \exp \left[ - \left( \frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{1/b} \right] \quad (5)$$

对任意可靠度下的疲劳寿命估算可由下式给出

$$N_R = N_0 + (N_a - N_0) [\ln(1/R)]^{1/b} \quad (6)$$

### 4 试验结果

在  $\sigma_a - N$  双对数坐标系中,钢材的  $S - N$  曲线在中等寿命区基本上是一条直线,因此试验中采用两个应力水平。低周疲劳的循环数控制在  $2 \times 10^5$  左右,高周疲劳的循环数控制在  $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$  左右,低周疲劳的应力幅取  $\sigma_a = 161.28 \text{ MPa}$ ,高周疲劳的应力幅取  $\sigma_a = 73.92 \text{ MPa}$ ,应力比均为 0.3。

表 2 为低周疲劳的 12 个试件和高周疲劳的 11 个试件的试验结果,按疲劳寿命由小到大排列,存活率按式(4)计算,其结果也列在表 2 中,起始寿命  $N_0$  的值经调整在低周疲劳取  $N_0 = 0.93 \times 10^5$ ,高周疲劳取  $N_0 = 0.9 \times 10^6$ 。图 3 为低周疲劳和高周疲劳的试验值在威布尔坐标纸上的位置,其分布已很靠近一直线,直线的方程采用最小二乘法拟合后得出的威布尔分布参数及按式(6)得出的可靠度  $R = 0.5$  的中值寿命如表 3。

表 2 疲劳试验结果

Tab.2 Data of fatigue experiment

序数	低周疲劳			高周疲劳		
	存活率 P/%	疲劳寿命 N × 10 <sup>-5</sup> /cycle	lg(N <sub>i</sub> - N <sub>0</sub> )	存活率 P/%	疲劳寿命 N × 10 <sup>-6</sup> /cycle	lg(N <sub>i</sub> - N <sub>0</sub> )
1	92.31	1.400	4.672	91.67	1.760	5.934
2	84.62	1.527	4.776	83.33	1.930	6.013
3	76.92	1.695	4.884	75.00	2.180	6.107
4	69.23	1.791	4.935	66.67	2.230	6.124
5	61.54	1.810	4.944	58.33	2.390	6.173
6	53.85	2.012	5.034	50.00	2.430	6.185
7	46.15	2.071	5.057	41.67	2.430	6.185
8	38.46	2.088	5.064	33.33	2.500	6.204
9	30.77	2.152	5.087	25.00	2.920	6.305
10	23.08	2.330	5.146	16.67	3.020	6.326
11	15.38	2.502	5.196	8.330	3.100	6.342
12	7.69	2.556	5.211			

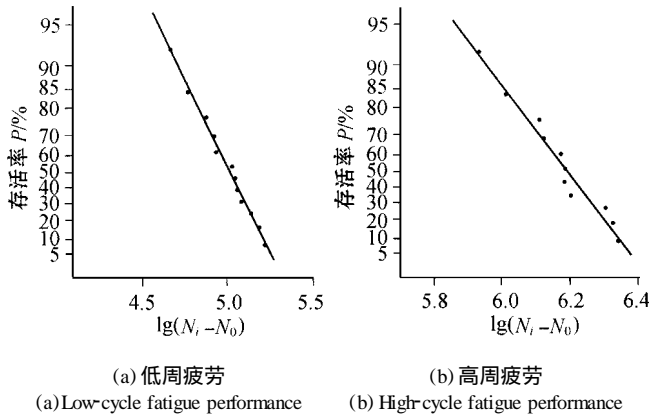


图 3 疲劳数据的概率分析

Fig. 3 Statistical analysis of fatigue data

表 3 威布尔参数及中值寿命

Tab. 3 Parameters of Weibull distribution and median life

低周疲劳			高周疲劳		
威布尔斜率	特征寿命 $N_a/cycle$	中值寿命 $N_{50}/cycle$	威布尔斜率	特征寿命 $N_a/cycle$	中值寿命 $N_{50}/cycle$
2.689	$2.139 \times 10^5$	$1.985 \times 10^5$	3.426	$2.615 \times 10^6$	$2.441 \times 10^6$

根据以上参数按式(1)分别作出低周疲劳和高周疲劳的威布尔分布密度函数如图4所示。可以看出,在低周疲劳时的分布密度函数是偏态的,如采用正态分布处理在分布带的两端将引起误差,而在高周疲劳时的分布密度函数形状与正态分布很近似,两种处理方法将得出相近的结果。

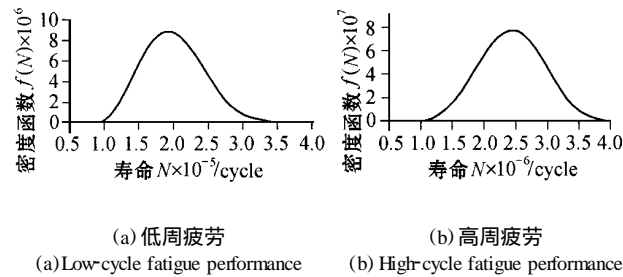


图 4 威布尔分布密度函数

Fig. 4 Density function of Weibull distribution

对焊接接头的安全性评估,取可靠度为  $R = 0.999$  是可以接受的,在这个可靠度下的疲劳寿命由式(6)确定为,低周疲劳  $N_{999} = 1.023 \times 10^5$  及高周疲劳  $N_{999} = 1.136 \times 10^6$ 。

按威布尔分布处理得到的焊接接头的  $R-S-N$  曲线如图5所示,图中分别作出了可靠度  $R = 0.5$  和  $R = 0.999$  的两条  $S-N$  线,其方程分别为

$$R = 0.5 \quad \lg N = -3.2166 \lg a + 12.3989$$

$$\text{或} \quad N = 2.5055 \times 10^{12} a^{-3.2166} \quad (7)$$

$$R = 0.999 \quad \lg N = -3.0859 \lg a + 11.8223$$

$$\text{或} \quad N = 6.6420 \times 10^{11} a^{-3.0859} \quad (8)$$

图5中AB线为按对数正态分布处理得到的可靠度  $R = 0.999$  的  $S-N$  曲线。可以看出,在低周疲劳时正态分布处理得到的寿命估算偏于保守,这是因为试验数据的分布是偏态的原因,而在高周疲劳时两者得

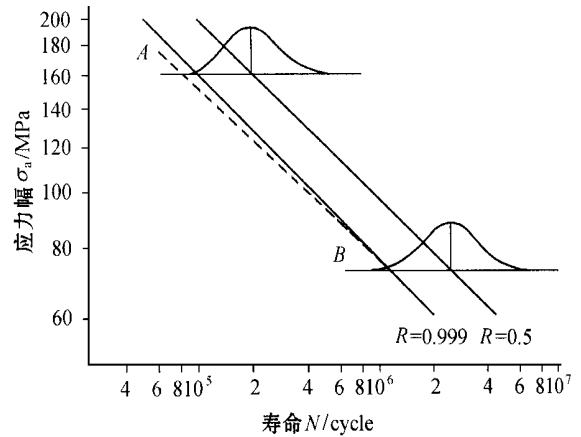


图 5 焊接接头的  $R-S-N$  曲线

Fig. 5  $R-S-N$  curves of welded joints

出了相近的结果。

图5表明,不同可靠度的  $S-N$  曲线的斜率变化不大,在工程应用中可以近似地认为它们是相互平行的。对任意可靠度可以由式(6)确定高周疲劳寿命,然后作中值  $S-N$  曲线的平行线,即得到这个可靠度下的  $S-N$  曲线,这样做对低周疲劳寿命的估算会偏于保守,但引起的误差在可以接受的范围内。

### 5 结论和讨论

1) 本文对海洋平台用钢焊接接头的疲劳性能进行了分析,给出各可靠度下疲劳寿命的估算式。

2) 试验结果表明,焊接接头在低周疲劳时的寿命分布是偏态的,而在高周疲劳时的寿命分布接近于正态分布。

3) 焊接接头试验结果的可靠性分析表明,不同可靠度的  $S-N$  曲线斜率与中值  $S-N$  曲线斜率相近。作为工程应用,建议可以近似采用中值  $S-N$  曲线的斜率作为其他可靠度  $S-N$  曲线的斜率,以简化计算。

### 参 考 文 献

- 1 Gurney T R. The basis of the revised fatigue design rules in the department of energy offshore guidance notes. Second International Conference on Offshore Structure, London, 1982. 55.
- 2 Gurney T R. The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints. BOSS Conference, London, August 1979. 41.
- 3 Holmes R. The fatigue strength of welded connections subjected to north sea environmental and random loading conditions. Proceeding of Third International Conference of Behaviour of Offshore Structure, Cambridge, Massachusetts, 1982. 2. 26 ~ 36.
- 4 Booth G S. The influence of simulated north sea environmental conditions on the constant amplitude fatigue strength of welded joints. Eleventh Annual Offshore Conference, Houston, 1979. OTC-3420.
- 5 Irvine N M. The concept and definition of hot stress as used in the revised guidance for fatigue assessment of welded tubular joints. Second International Conference on Offshore Welded Structure, London, 1982. 54.
- 6 程育仁. 疲劳强度. 北京:中国铁道出版社,1990.